

Hogyan mérünk neutrínó-sebességet?

ATOMKI szeminárium, 2011 dec. 7.

Horváth Dezső

MTA KFKI RMKI, Budapest
és MTA ATOMKI, Debrecen



Vázlat

- Az 1987A szupernova neutrínói.
- Földi nagy távolságú kísérletek.
- A MINOS kísérlet.
- CNGS és OPERA.
- A távolság mérése.
- Az idő mérése.
- Lehetséges buktatók...

Apropó

Az OPERA-kísérlet 2011 szept. 21-én kiszivárogtatja, majd másnap hivatalosan bejelenti (ArXiv-cikk, CERN-előadás), hogy fénysebességnél (2.5×10^{-5} -szer) gyorsabb neutrínókat észleltek a CERN és a Gran Sasso Nemzeti Laboratórium között (732 km).

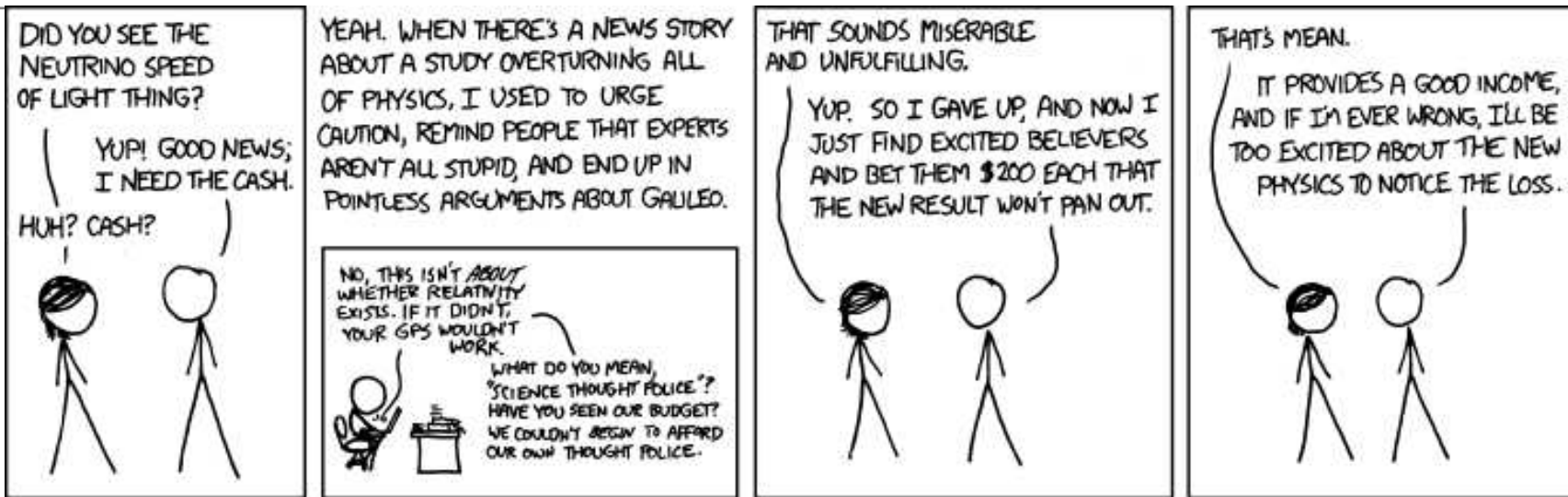
Szkeptikusak vagyunk, amikor a fizika eddig ismert törvényszerűségeinek ellentmondó jelenséget fedeznek fel, különösen, amikor kiszivárogtatással kezdődik.

Számos felfedezés, (ALEPH, CDF, ...) Higgs-bozonok, dibarion, pentakvark, ... az ellenőrzésben elenyészett.

Rolf-Dieter Heuer (DG of CERN): „I agreed to the seminar at CERN because it is the duty of a lab like CERN to give the collaboration the possibility to ask the community for scrutiny of their findings.”



Szkeptikusak vagyunk...



<http://xkcd.com/955/>

- Láttad a neutrínó – fénysebesség dolgot? – Aha, remek, szükségem van a pénzre. – Pénzre?
- Régebben, amikor hír jött a fizika felfordulásáról, óva intettem, szóltam, hogy a szakértők nem mind hülyék, és haszontalan vitákba bonyolódtam Galileiről.
- Ez elkeserítően hangzik. – Fel is adtam, most megkeresem az izgatott hívőket és fogadok velük 200 dollárba, hogy az új eredmény nem igazolódik.
- Ez durva. – Remek jövedelmet biztosít, és ha valaha tévedek, túlságosan izgat majd az új fizika, hogy a veszteséggel törődjem.

SN 1987A: ν -zápor

D.N. Schramm, J.W. Truran, Phys. Repts. 189 (1990) 89.

Neutroncsillag kötési energiája: 99% neutrínóban távozik

SN 1987A: Nagy Magellán-felhőben, 168000 fényévre

$\sim 10^{58}$ ν , fele első 1–2 s, többi 10–100 s alatt

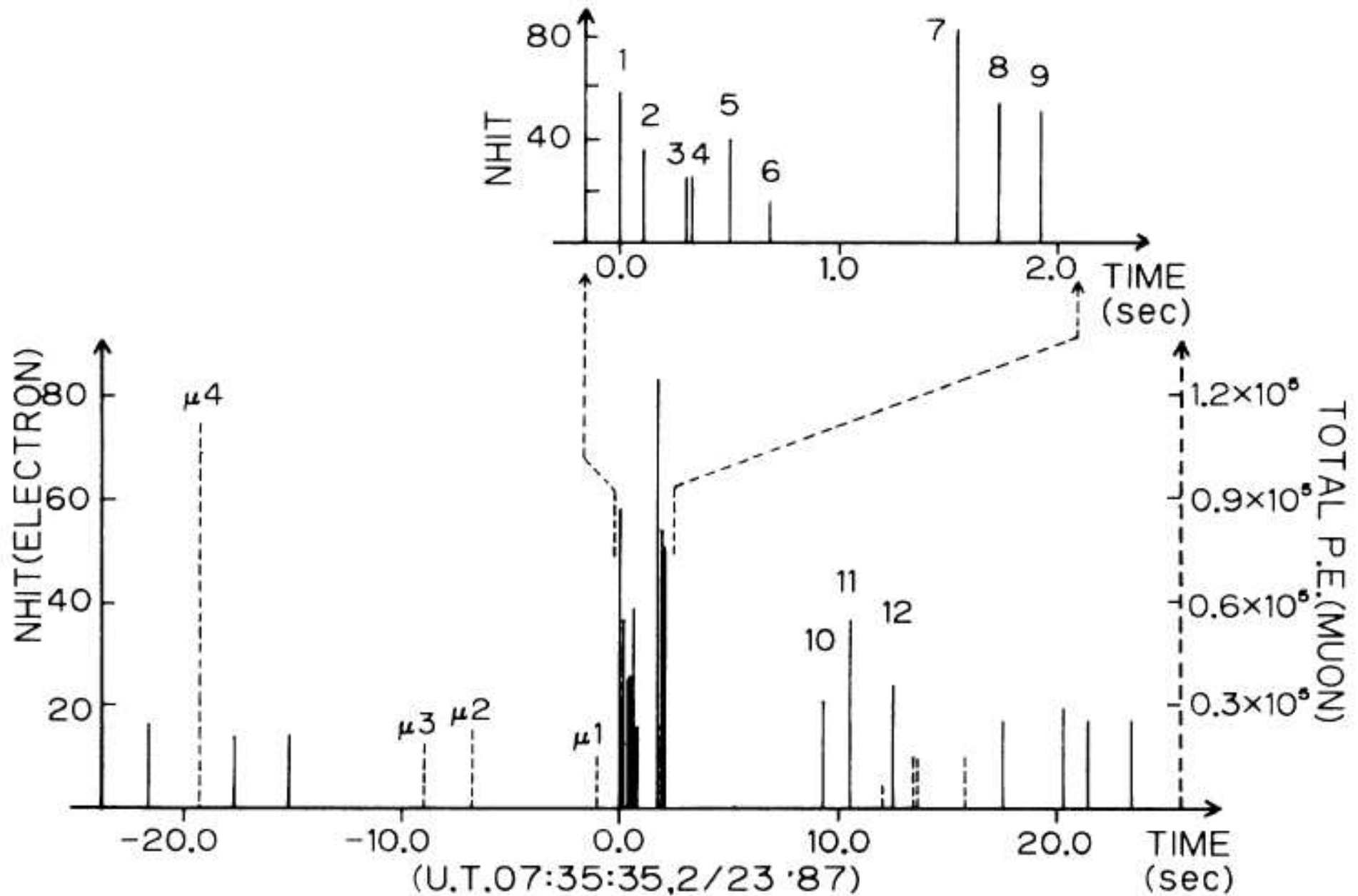
$\langle E_\nu \rangle \sim 10 \dots 15$ MeV.

Kamiokande: 2140 tonna \rightarrow 11 beütés várható

Neutrínóészlelés 1987 febr. 23-án:

- 2h52', Kamiokande, 2,14 kt: 1 ν (7 MeV) / 10 s (tipikus háttér)
- 2h52', IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven), 6 kt: 0 ν
- 7h35', Kamiokande: 11 ν (7...35 MeV) / 13 s
- 7h35', IMB: 8 ν (20...40 MeV) / 4 s

SN 1987A: ν -zápor, Kamiokande



SN 1987A: fényhozam

Neutrínók kollapszus pillanatában keletkeznek.
Fényjel késleltetve, amikor a hő elkezd kiszabadulni.
Vörös óriás: napok, **kék óriás**: órák múlva.

Fényjel 1987 febr. 23-án:

- 10h40': fényképen megjelenik
- 10h53': felfedezés
- Világít 1988 szeptemberéig

A fényjel 3 órát késett, kék óriás volt

Neutrínósebességre felső határ:

$$\left| \frac{v_\nu - c}{c} \right| < 2 \times 10^{-9}$$

SN 1987A: fényhozam

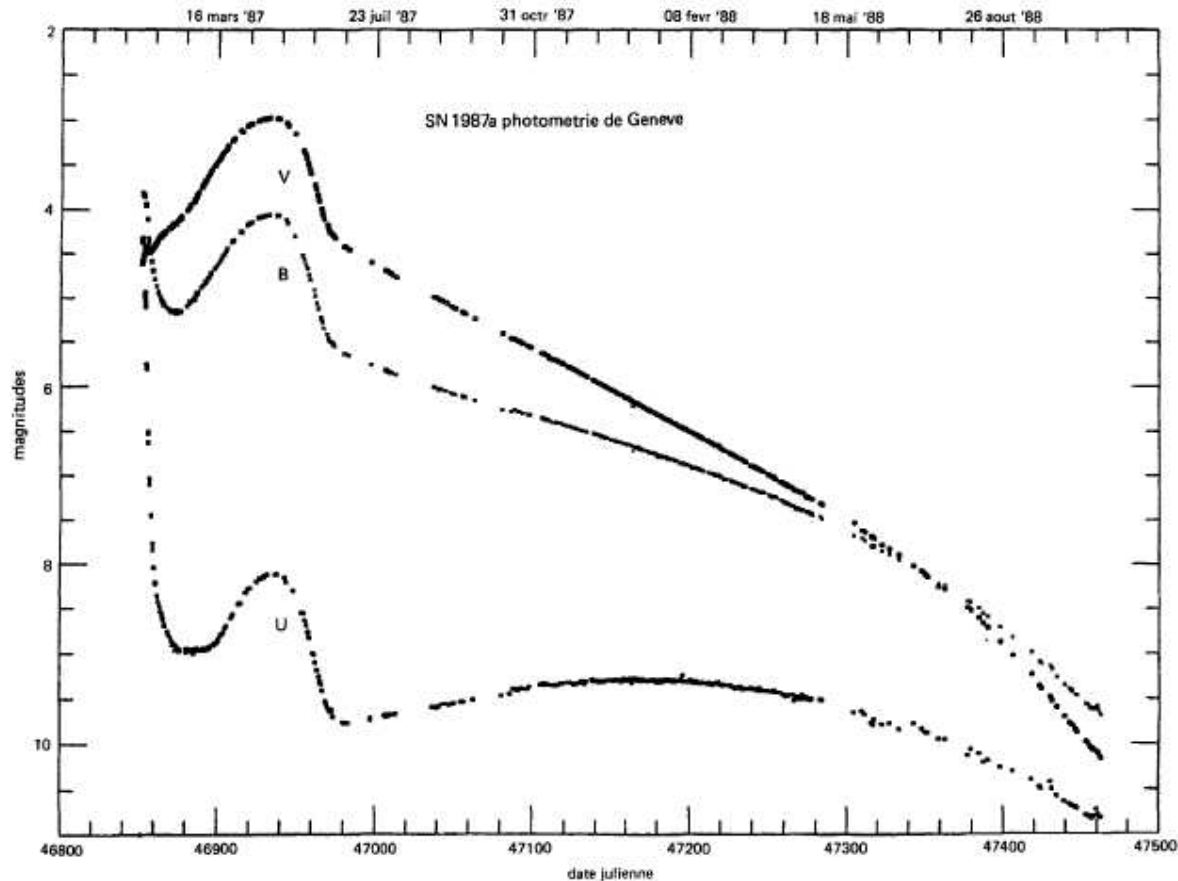


Fig. 4. Visual light curve of Supernova 1987A.

D. N. Schramm and J. W. Truran, *New physics from Supernova 1987A*

101

OPERA müon-neutrínói korábban:

$$2.5 \times 10^{-5} \times 168000 \sim 4.2 \text{ év}$$

Neutrínósebességre felső határ: $|v_\nu - c|/c < 2 \times 10^{-9}$

SN 1987A: kozmikus ν -zápor korábban?

4-5 évvel korábban Kamiokande nem működött

Kozmikus (nem Nap-, földi vagy légköri): $E_\nu > 20$ MeV

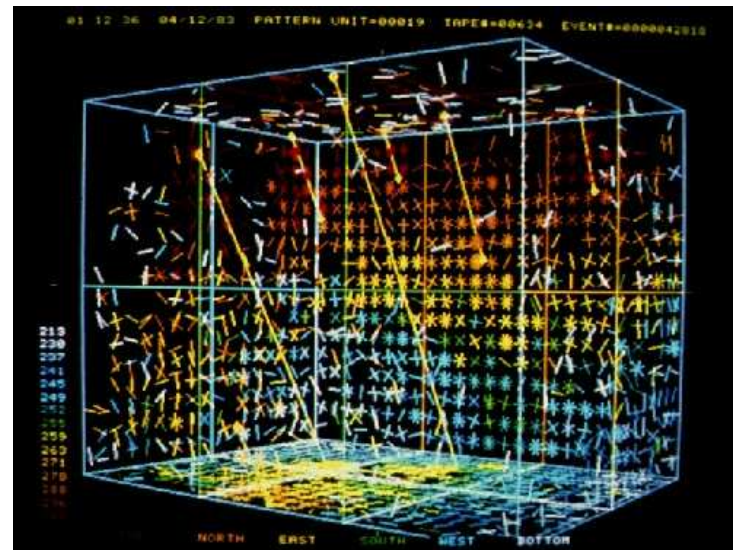
Baksan szcintillátor-teleszkóp (SzU)

- 1980-1986: 0.16 ν /nap
- 1987.02.23: 5 ν / 9.1 sec



IMB vizes Cserenkov-det (USA)

- 1982-1986: 2 ν /nap
- 1987.02.23: 8 ν / 4 sec



Gyorsító neutrínó-kísérletek

oszcilláció vizsgálatára

$$pA \rightarrow \pi^\pm X \quad \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu; \quad \mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_\mu \nu_e$$

$L \sim 1 \dots 1000$ km, $\nu_e + 2\nu_\mu$; ν és $\bar{\nu}$

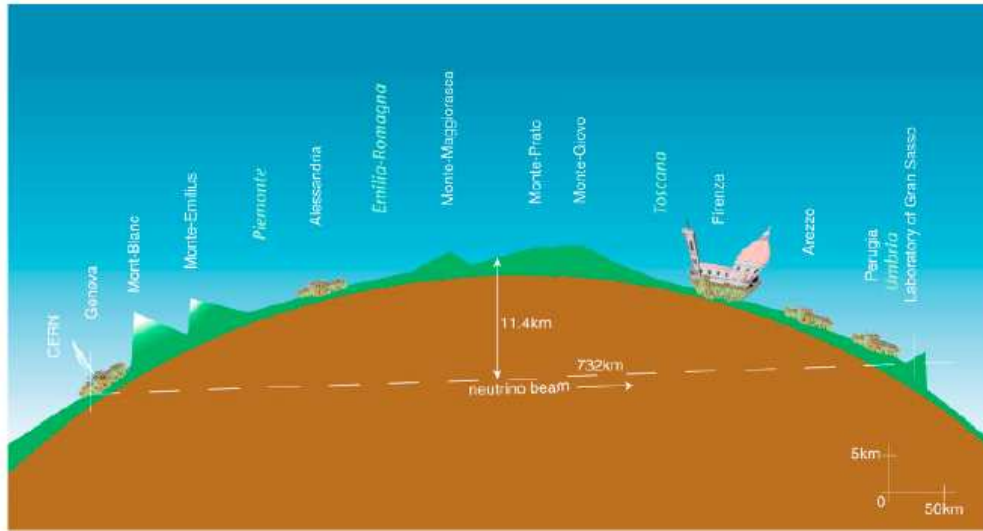
Gyorsító analóg léggörrel $L \sim 30$ km

Nagy energián $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ előre megy.

Müon lelassul bomlás előtt \Rightarrow termékek 4π -be.

\sim tiszta ν_μ nyaláb.

Nagy távolságú gyorsító kísérletek



CNGS: CERN → Gran Sasso:
OPERA, 732 km

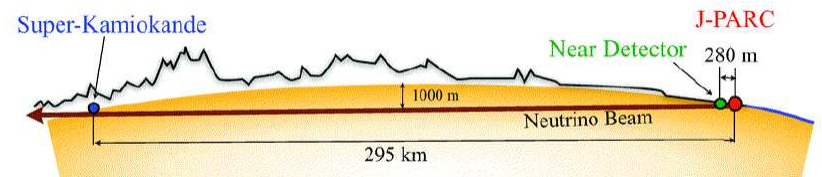


K2K: KEK → Kamioka: 250 km

Horváth Dezső: Hogyan mérünk neutrínó-sebességet?



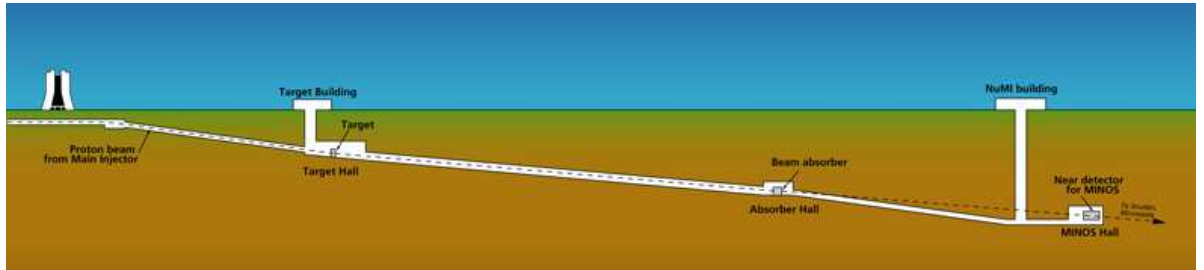
Fermilab → MINOS: 735 km



T2K (Tokai → Kamioka): 295 km

A MINOS-kísérlet

Main Injector Neutrino Oscillation Search



NUMI → MINOS Near Detector

Hasonló vas + szcinti kaloriméterek

Near Detector (980 tonna):

93% ν_μ , 6% $\bar{\nu}_\mu$, 1% ($\nu_e + \bar{\nu}_e$)

↓ 734 km ↓

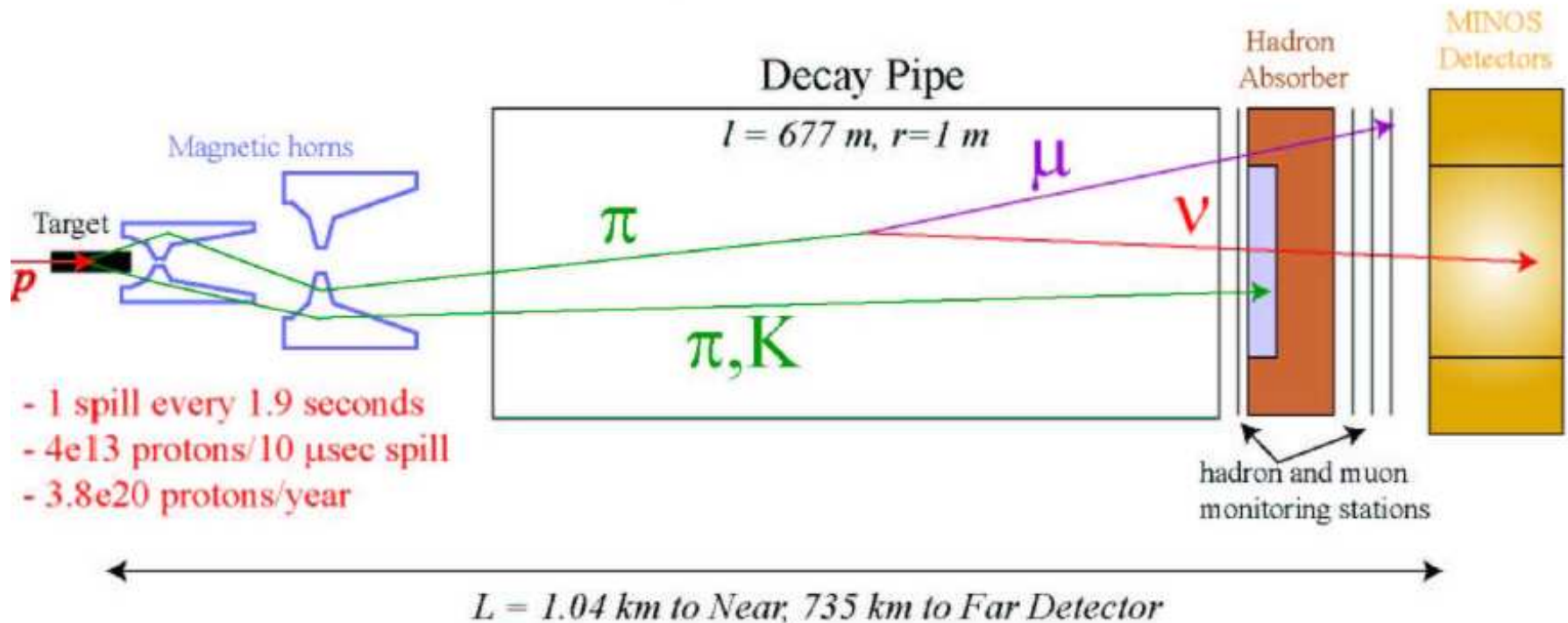
Far Detector (5400 t): $\sim 60\% \nu_\mu$

NuMI ν -nyaláb

$E(\nu_\mu) \sim 3 \text{ GeV}$

MINOS Coll., P. Adamson et al., Phys. Rev. D76, 072005 (2007)

NUMI → MINOS nyalábvezeték



- Pionröptetés: 677 m vákuum
- Hadronok azonosítása, elnyeletése
- Müon azonosítása, elnyeletése: 300 m anyag
- Near detector: 1040 m, far detector: 735 km

A MINOS időmérése

ND \leftrightarrow FD távolság:

$$\Delta L = 734298.6 \pm 0.7 \text{ m}, \Delta t = 2449356 \pm 2 \text{ ns}$$

Időmérés indul: protonok kivonó mágnesse ($t_0 \pm \sim 1 \text{ ns}$)

Protoncsomagok: 5 v. 6 csomag, $9.7 \mu\text{s}$ hossz / 2,2 s

Pionbomlás 675 m-en, müonok azonosítása és elnyeletése

$$1.6 \times 10^6 \text{ ND-}\nu_{\mu}, 473 \text{ FD-}\nu \text{ (258 } \nu_{\mu}, \bar{\nu}_{\mu}\text{)}$$

Órák szinkronizálása GPS vevővel: $\pm 100 \text{ ns}$ jitter

Időkülönbség mérése a neutrínók beérkezése között:

események legkorábbi szcintijele

Nem ugyanazok a neutrínók!

$$t_1 = t_{ND} - t_0 - t_{DN}; \quad t_2 = t_{FD} - t_0 - t_{DF}$$

t_{DF}, t_{DN} (GPS, kábeles, elektronikus) késleltetés

A MINOS időmérése: eloszlás

Egyedi események mérési pontossága < 10 ns.

Pontosság: $\sigma_t(\text{ND}) = 18.8 \text{ ns}$; $\sigma_t(\text{FD}) = 1.6 \text{ ns}$

Legnagyobb sziszt. hiba: FD — GPS kábel (46 ns)

Teljes sziszt. szórás: 64 ns.

Ha $P_1^n(t_1)$ a neutrínók érkezési eloszlása ND-ben a MI $n = 5$ és $n = 6$ csomagos üzemében, akkor a FD-ben várható eloszlás

$$P_2^n(t_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int \exp -\frac{(t_2-t')^2}{2\sigma^2} P_1^n(t') dt'$$

($\sigma = 150 \text{ ns}$ az ND+FD korrelálatlan időbizonytalanság)

MINOS: ν -észlelések időbeli eloszlása

Kétféle üzemmód: 5 és 6 protoncsomag / spill

P. ADAMSON *et al.*

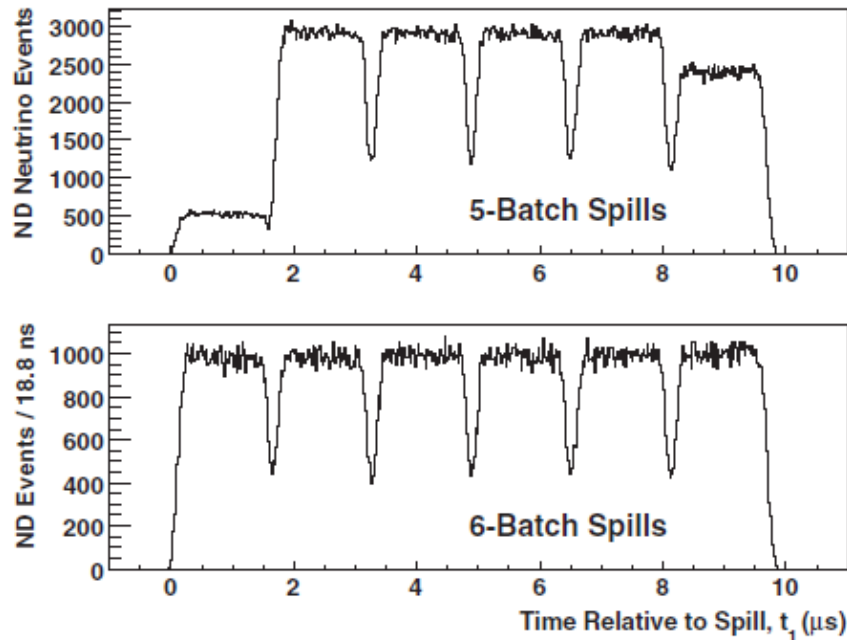


FIG. 1. Neutrino event time distribution measured at the MINOS near detector. The top plot corresponds to events in 5-batch spills $P_1^5(t_1)$ while the bottom plot corresponds to 6-batch spills $P_1^6(t_1)$.

Near Detector
(data)

PHYSICAL REVIEW D 76, 072005 (2007)

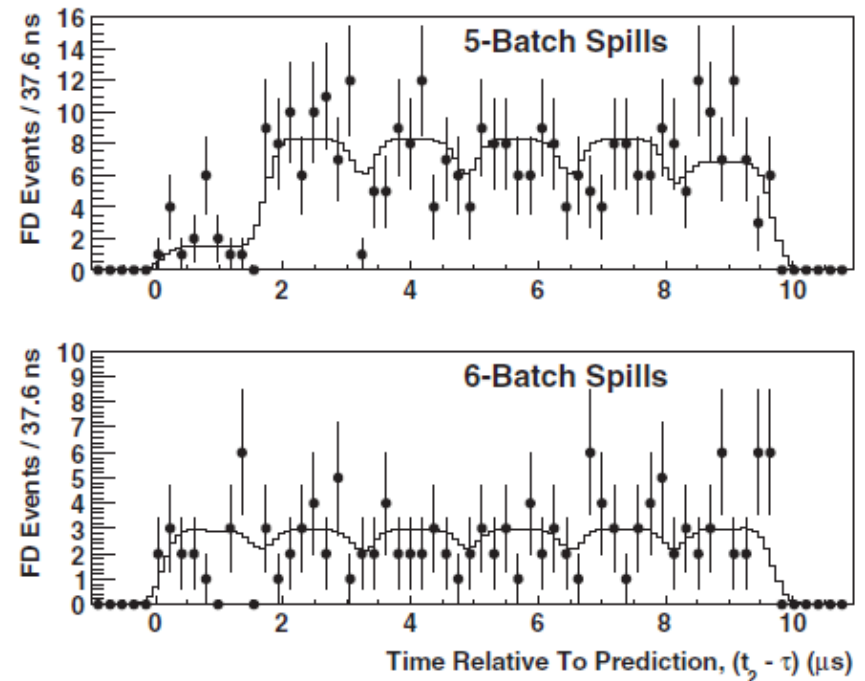


FIG. 2. Time distribution of FD events relative to prediction after fitting the time of flight. The top plot shows events in 5-batch spills, the bottom 6-batch spills. The normalized expectation curves $P_2^5(t)$ and $P_2^6(t)$ are shown as the solid lines.

Far Detector
(data + MC after fitting the time)

A MINOS időmérése: eredmény

δ eltérés a várt τ repülési időtől

$L = \sum_i \ln P_2(t_2^i - \tau - \delta) = \text{maximum}$
az összes FD-eseményre összegezve.

ν átlagos beérkezési ideje:

$$\delta = -126 \pm 32 \text{ (stat)} \pm 64 \text{ (syst) ns}$$

Relatív sebességkülönbség:

$$\frac{v_\nu - c}{c} = \frac{-\delta}{\tau + \delta} = (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5}$$

1.8σ különbség, nem szignifikáns

MINOS Coll., P. Adamson et al., Phys. Rev. D76, 072005 (2007)

CNGS → OPERA: Infóforrások

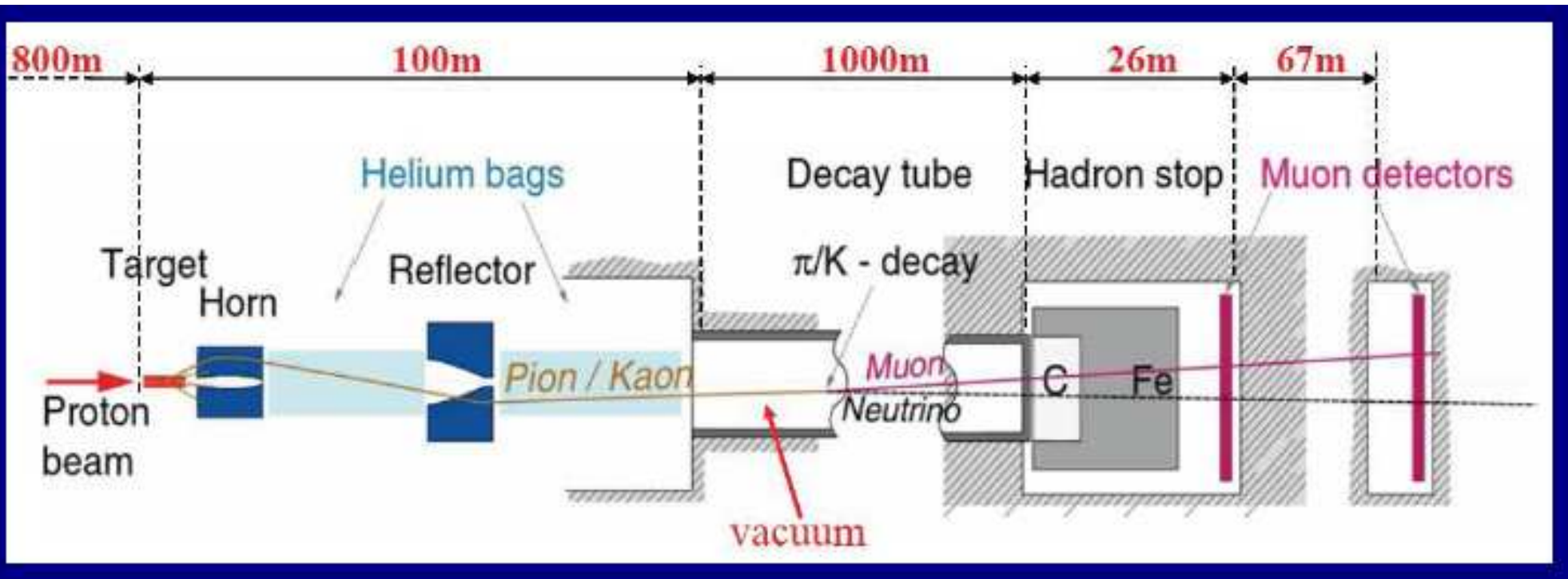
Dario Autiero előadása, CERN, 2011.09.22

T. Adam *et al.* (OPERA Collaboration),
„Measurement of the neutrino velocity with the OPERA
detector in the CNGS beam,”
arXiv:1109.4897 [hep-ex].

Rengeteg (százezres!) újságcikk és blog
Motto: „Nothing travels faster than light but gossip!”

>130 komoly fizikai publikáció, főként elméleti

CERN Neutrinos to Gran Sasso



Proton pion, kaon $K \rightarrow \pi, \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ K, π stop μ^\pm észlelése

Mindegyik részecske relativisztikus.

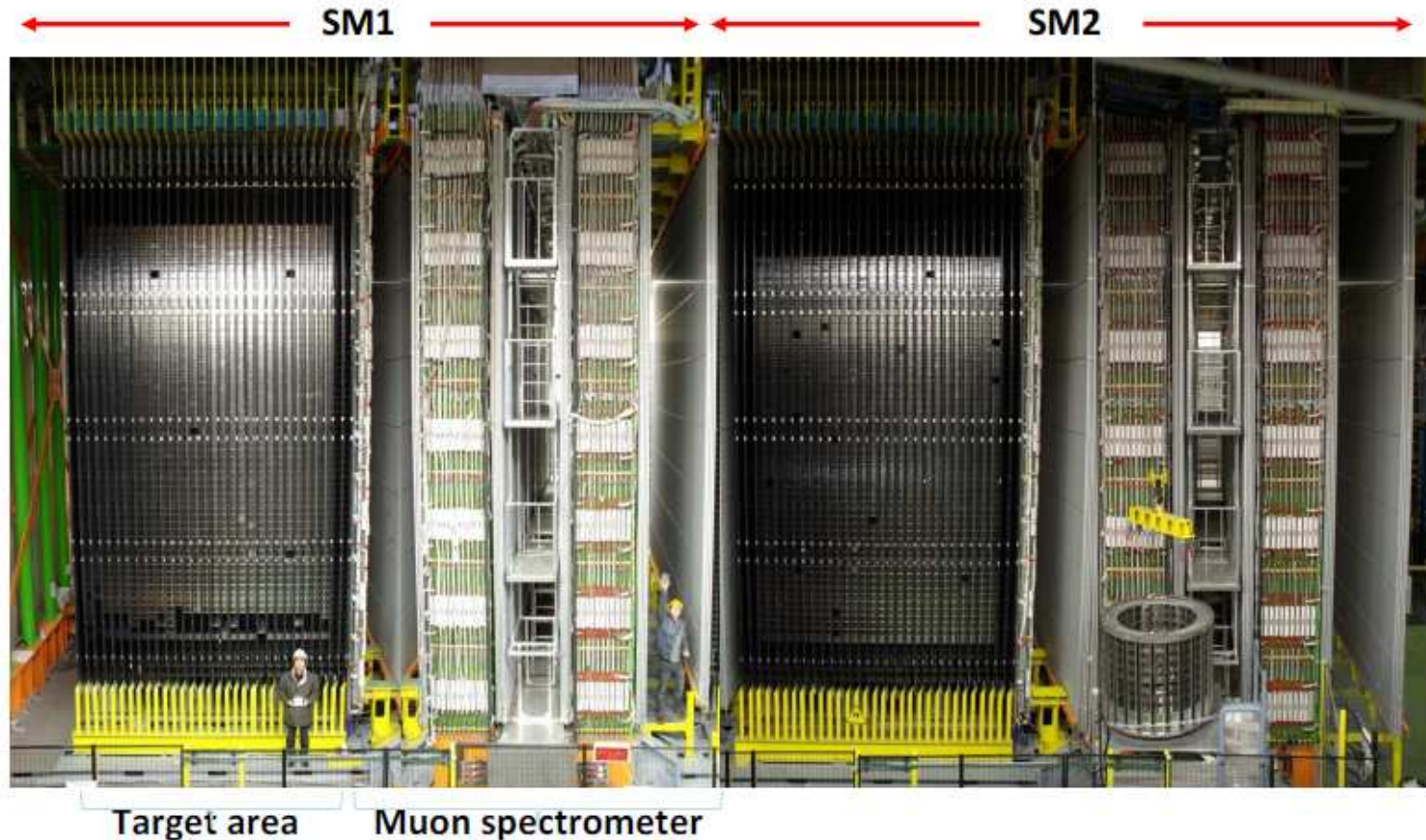
Müon bomlás előtt lelassul, $\mu \rightarrow e \nu_\mu \nu_e$ neutrínói szétszóródnak

Csak müon-neutrínó megy előre, müon elnyelődik útközben.

~ 17 GeV-es ν_μ -nyaláb szétterül, LNGS-nél FWHM = 2.8 km

Az OPERA-kísérlet

Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus

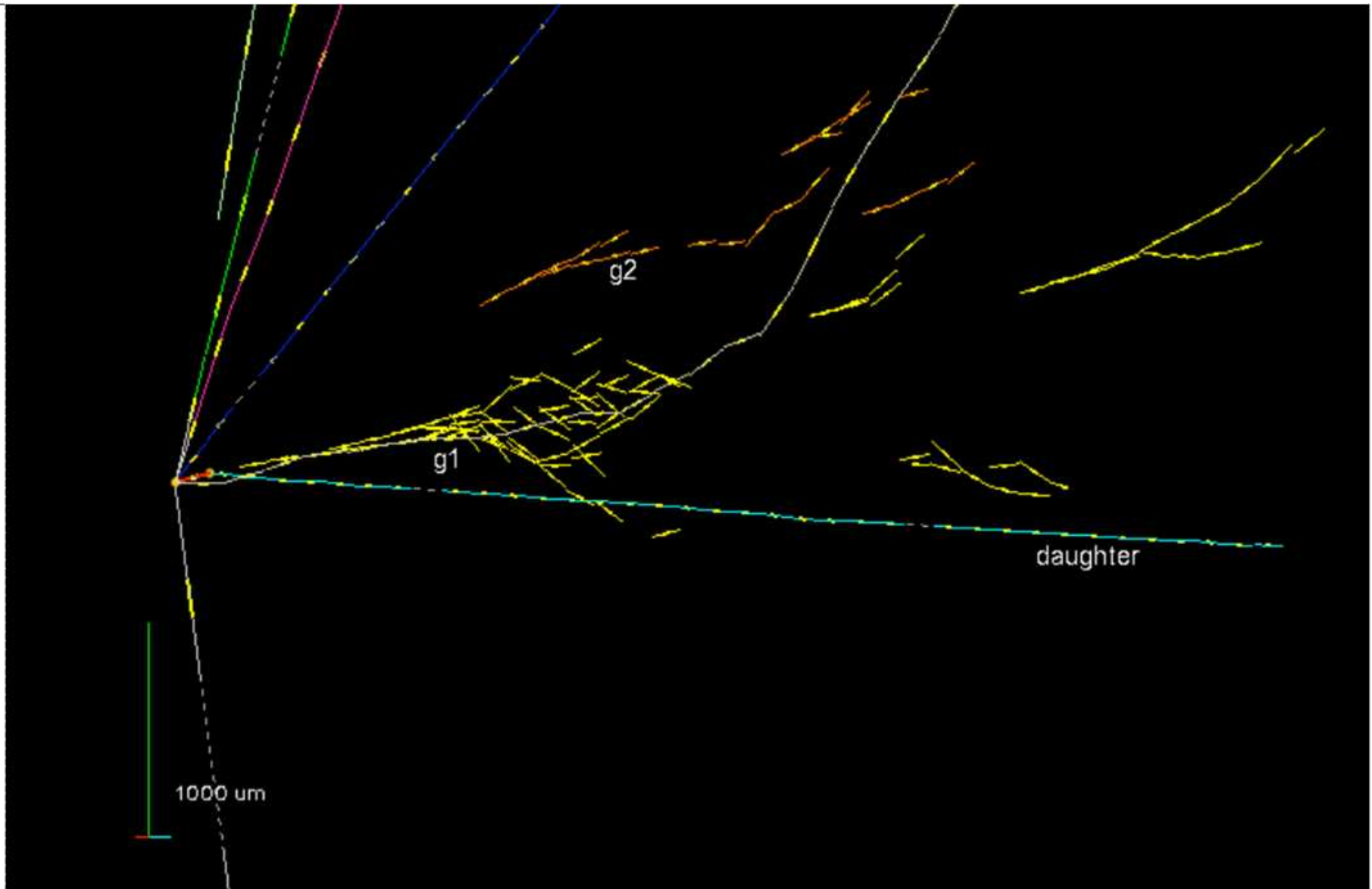


$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oszcilláció kimutatására

Blokk: ólomlemez + fotoemulzió + szcintillátor-hodoszkóp

2 szupermodul: 150000 blokk + mágneses spektrométer

Az OPERA tau-neutrínója: $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$



OPERA Coll., N. Agafonova et al., Phys.Lett.B691:138-145,2010

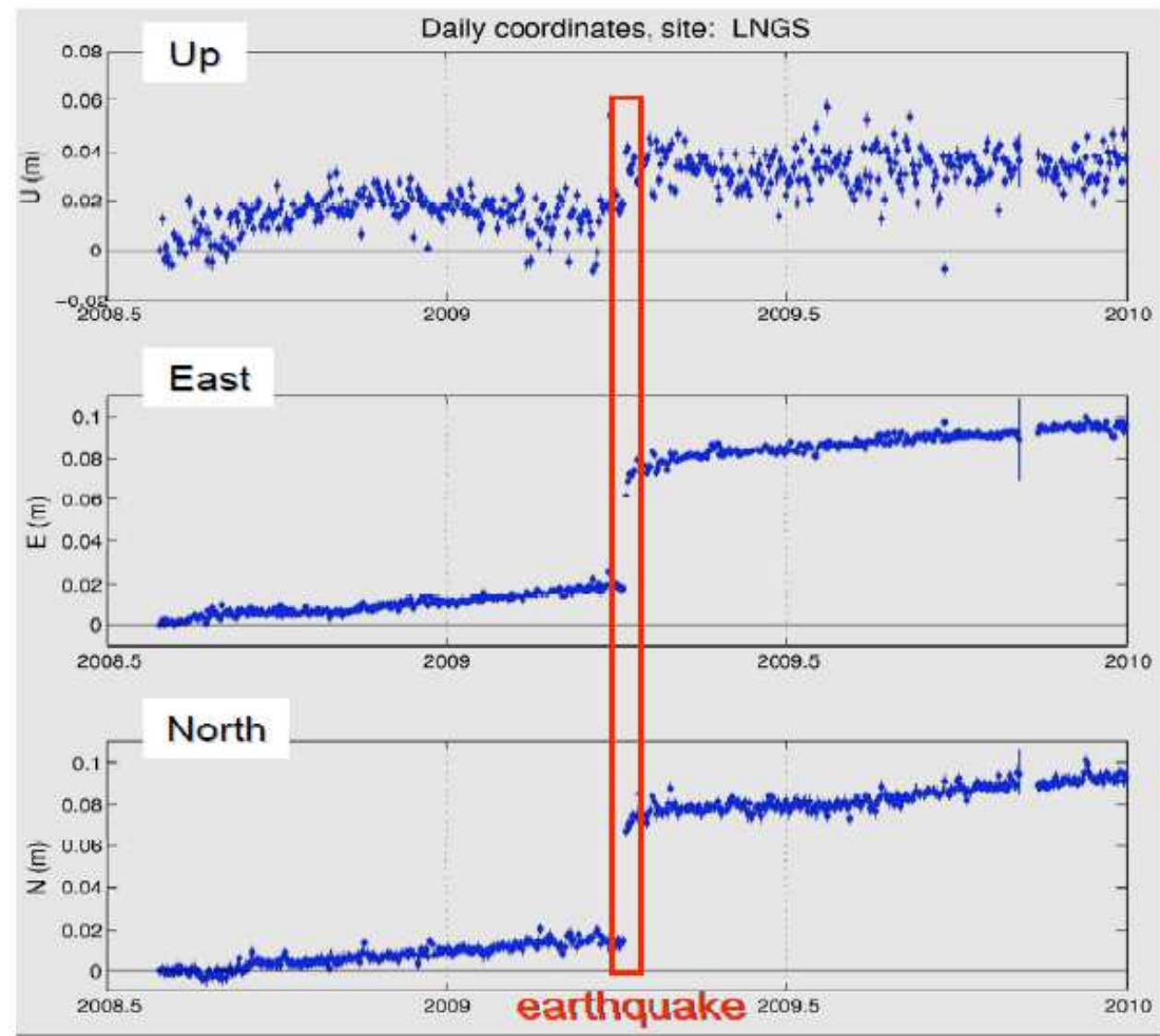
OPERA: folyamatos távolságmérés

2009-es
földrengés

Fel: 1 cm

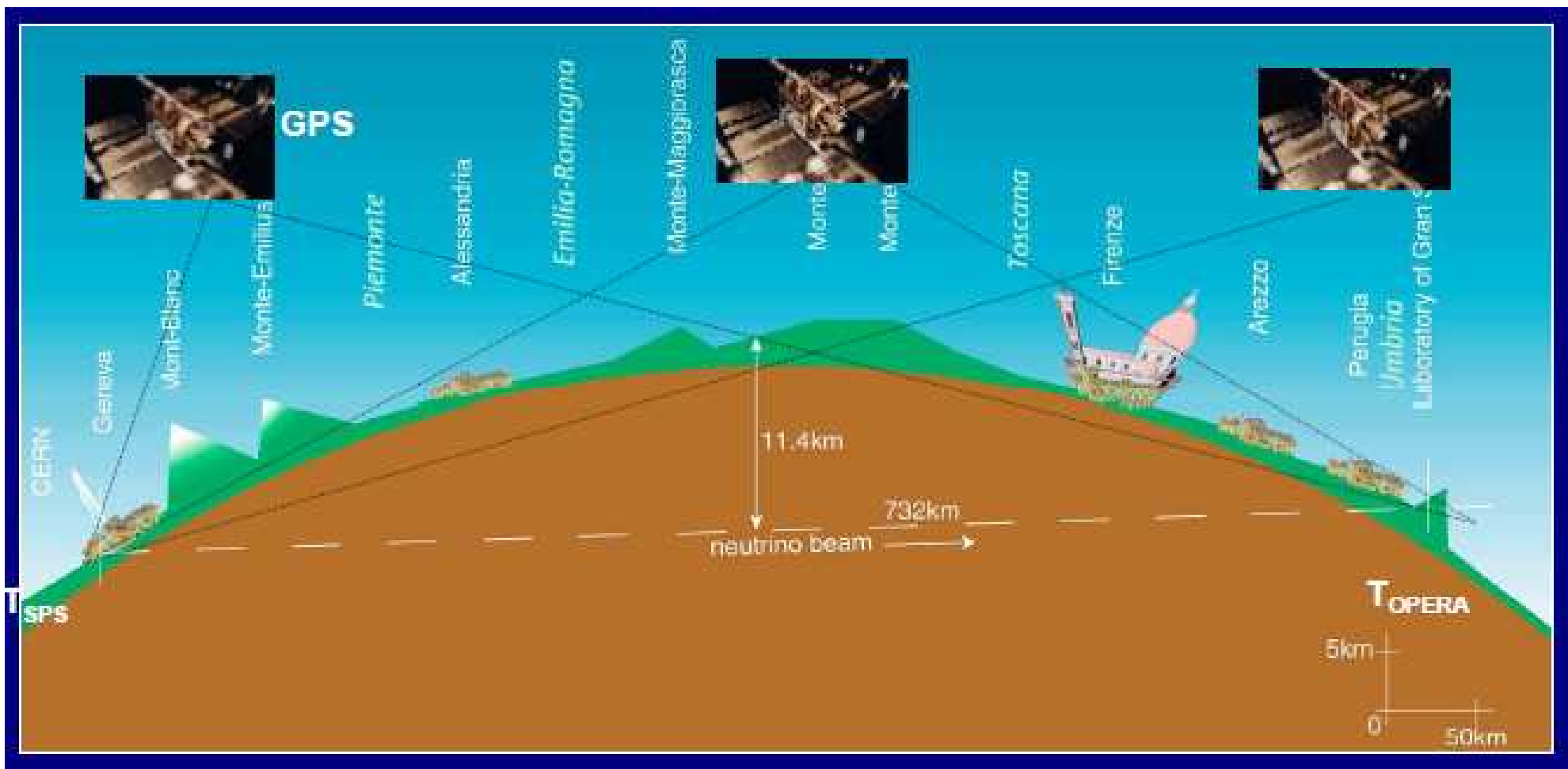
Keletre: 5 cm

Északra: 6 cm



Távolságmérés bizonytalansága: ± 20 cm

CNGS → OPERA időzítés: GPS

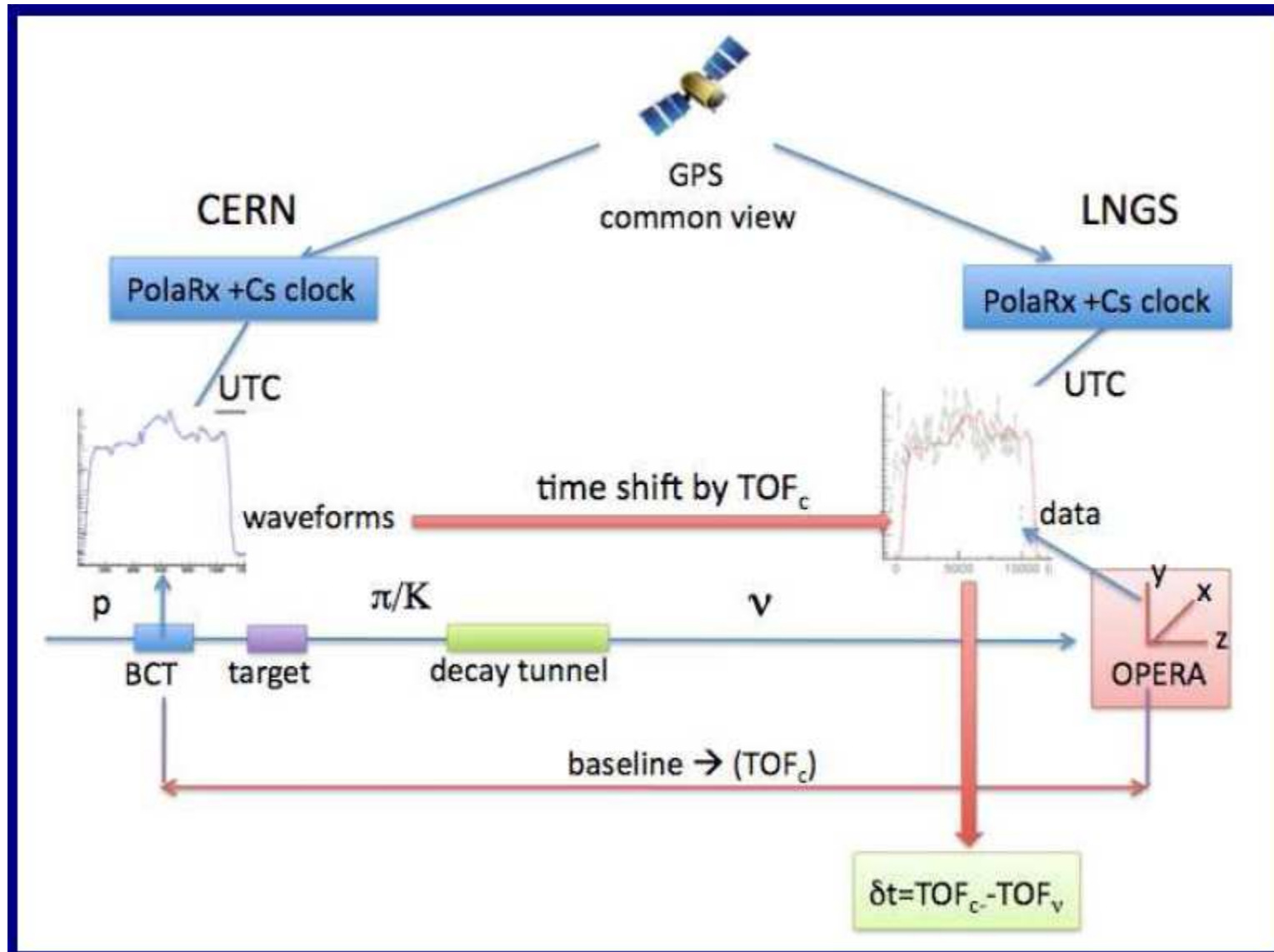


Időzítés proton-indítással:

$$|T(\text{OPERA}) - (T(\text{Kicker}) + T(\text{TOF}_c))| < 20\mu\text{s}$$

Szinkronizáció standard GPS-hez: ~ 100 ns Nem elég jó.

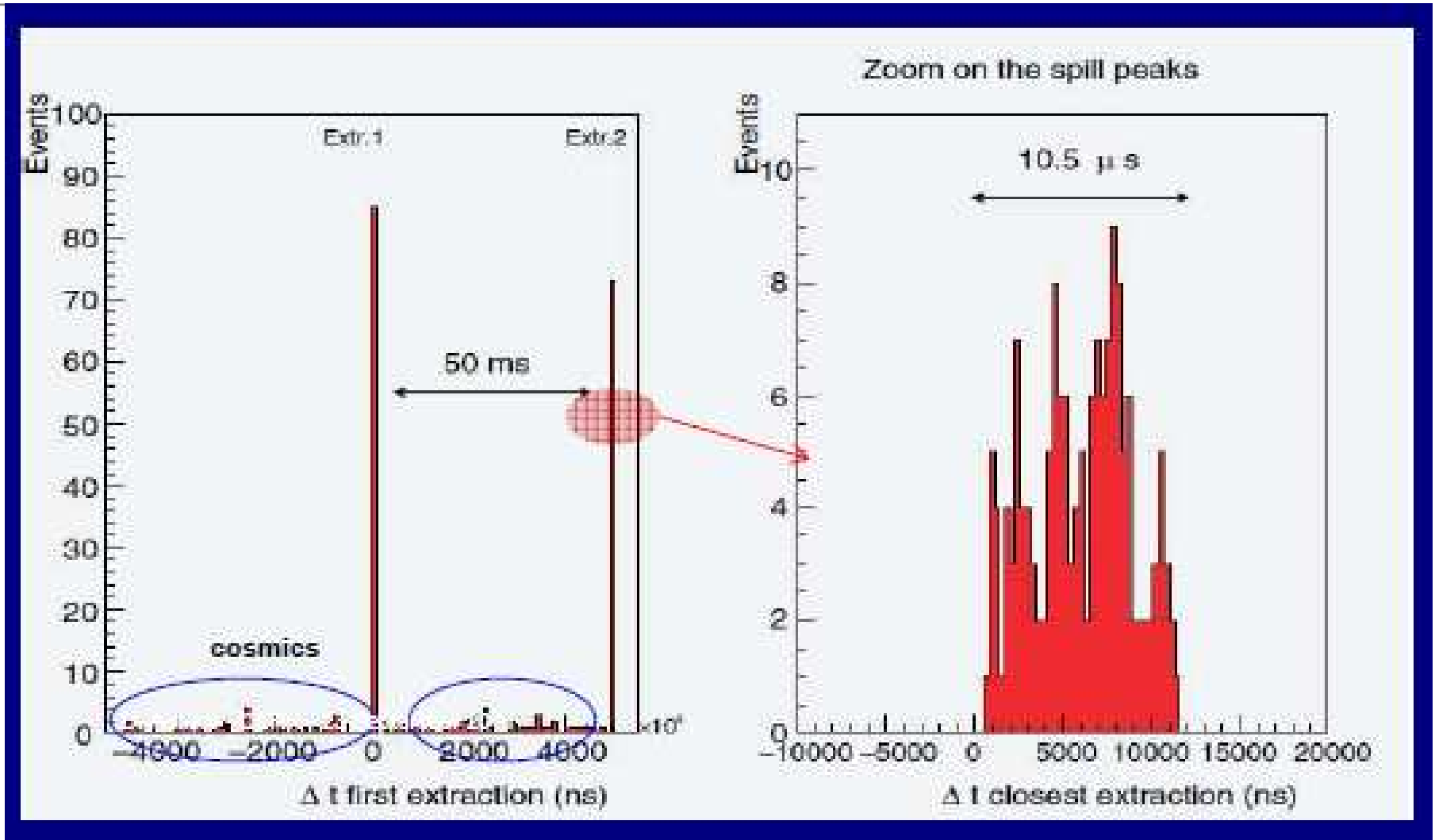
CNGS → OPERA időzítés



GPS-idejele nem eleg pontos

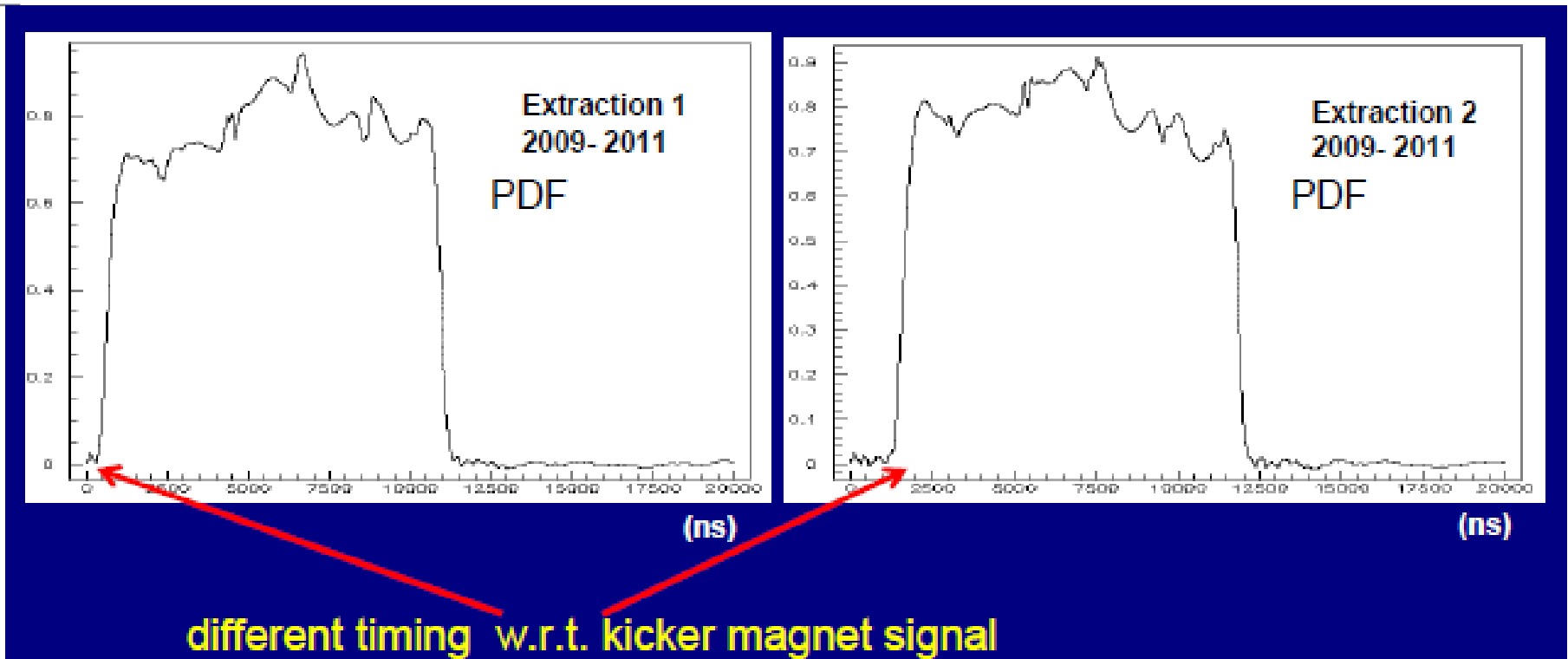
Cs atomorak helyben, GPS csak kozvetit.

CNGS neutrínók érkezése OPERÁ-ba



SPS-ből 2 ($10.5\mu\text{s}$ széles) protoncsomag 50 ms távolságra

Proton- és ν -csomagok



SPS: 2 protoncsomag időzítése és eloszlása különböző

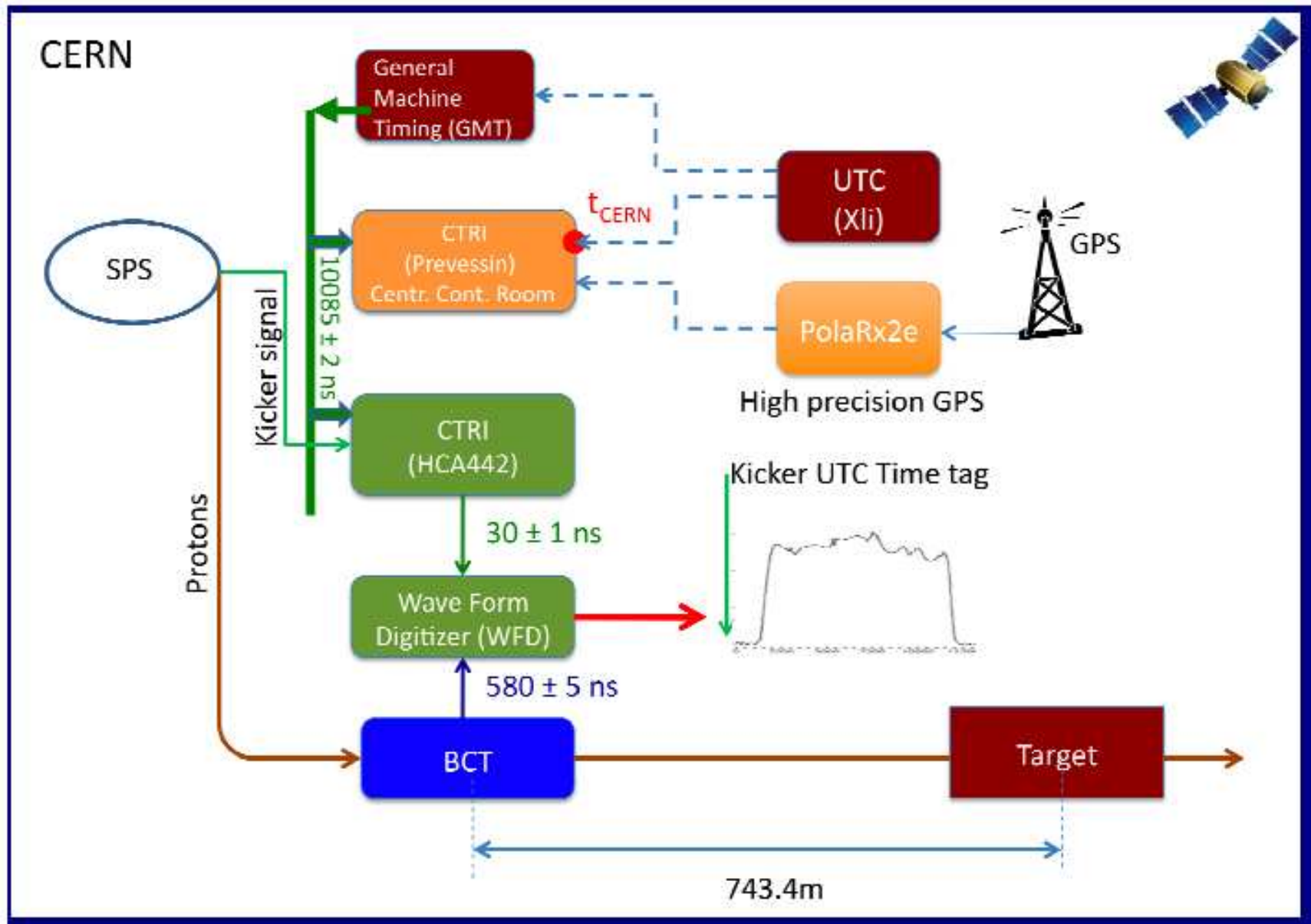
Neutrínó-indítás időzítése különböző.

MINOS: Near Detector (neutrínó) \Rightarrow

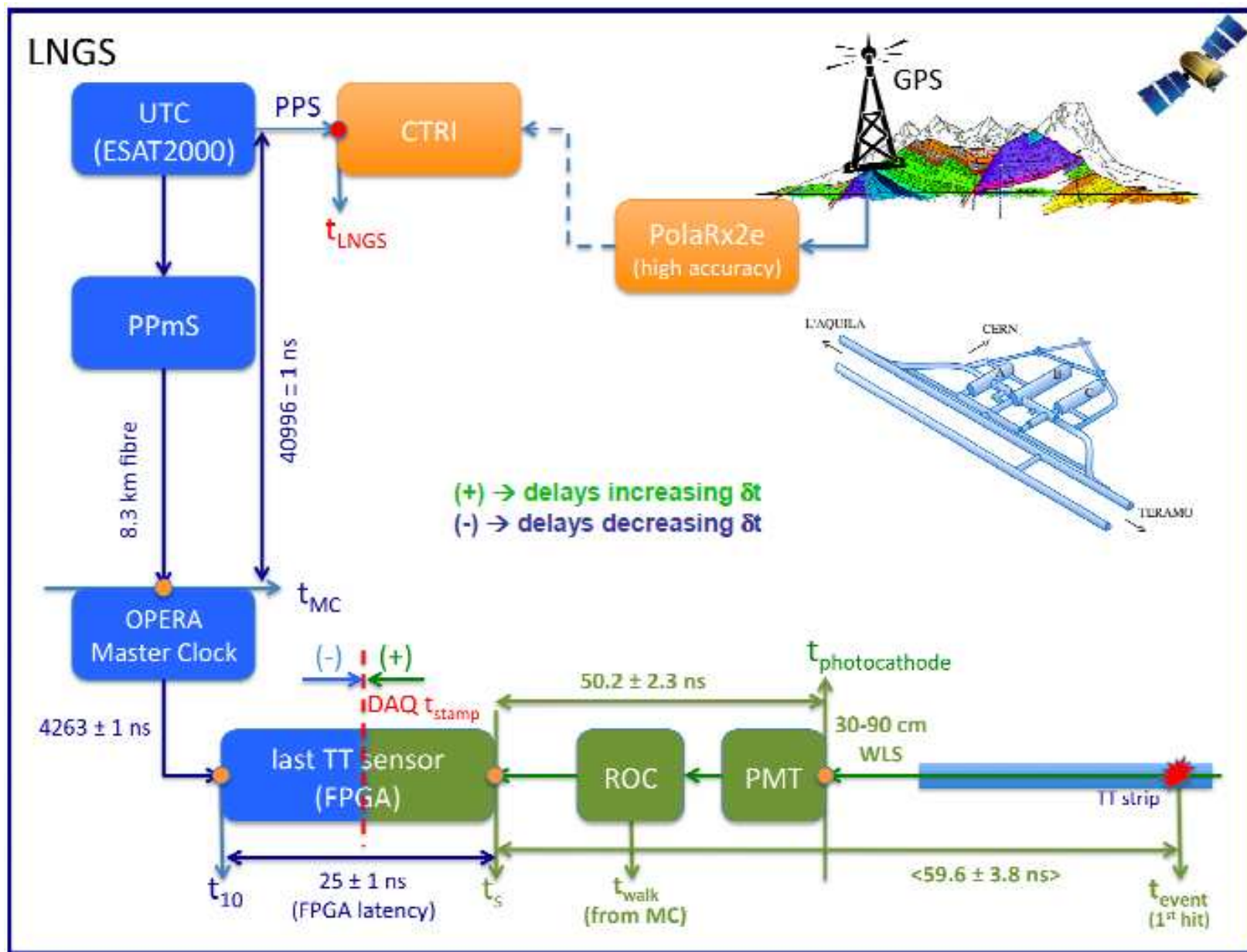
OPERA: kicker mágnes (proton)

Állandó CERN \leftrightarrow OPERA időkapcsolat (~ 1 ns)

OPERA: időmérés CERN-ben



OPERA: időmérés Gran Sasso-ban



Távolság- és időmérés hitelesítése

Távolságmérés:

European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)
(Eurázsiai földrészhez rögzített rendszerben)
Protontarget fókuszpontja ↔ OPERA-detektor eleje
(731278.0 ± 0.2) m, fő hibaforrás: LNGS alagút

Mérés: CERN és LNGS geodéziai csoportjai

Ellenőrzés: Római Sapienza Egyetem, Geodézia csoport

Időmérés:

Mérés: Swiss Metrology Institute

Ellenőrzés: Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Braunschweig és Berlin
(a német metrológiai hivatal)

OPERA: vak analízis

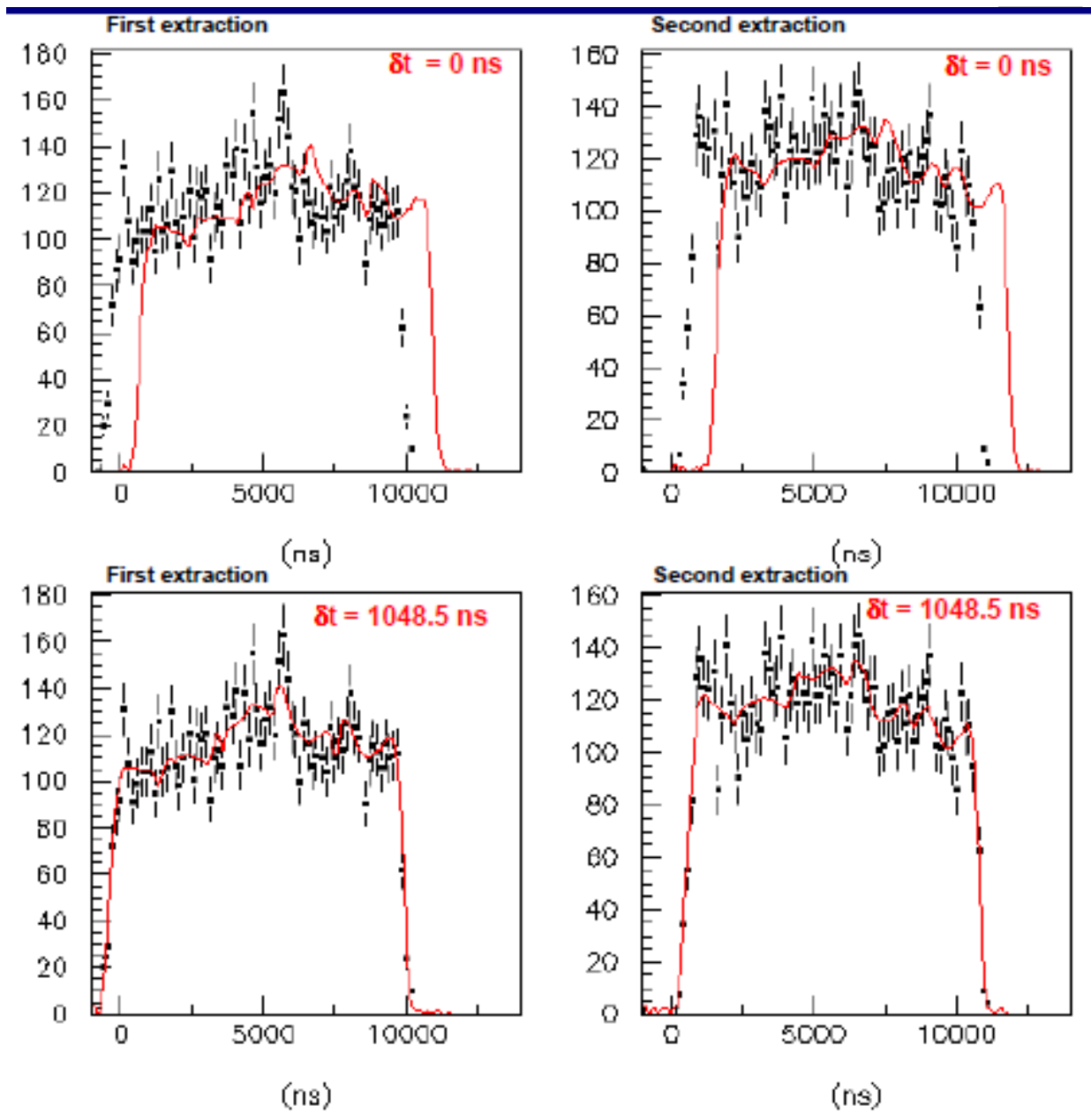
Illesztés előtt: $\delta t = 0$

Késleltetés illesztése:
 $\delta t = 1048.5$ ns

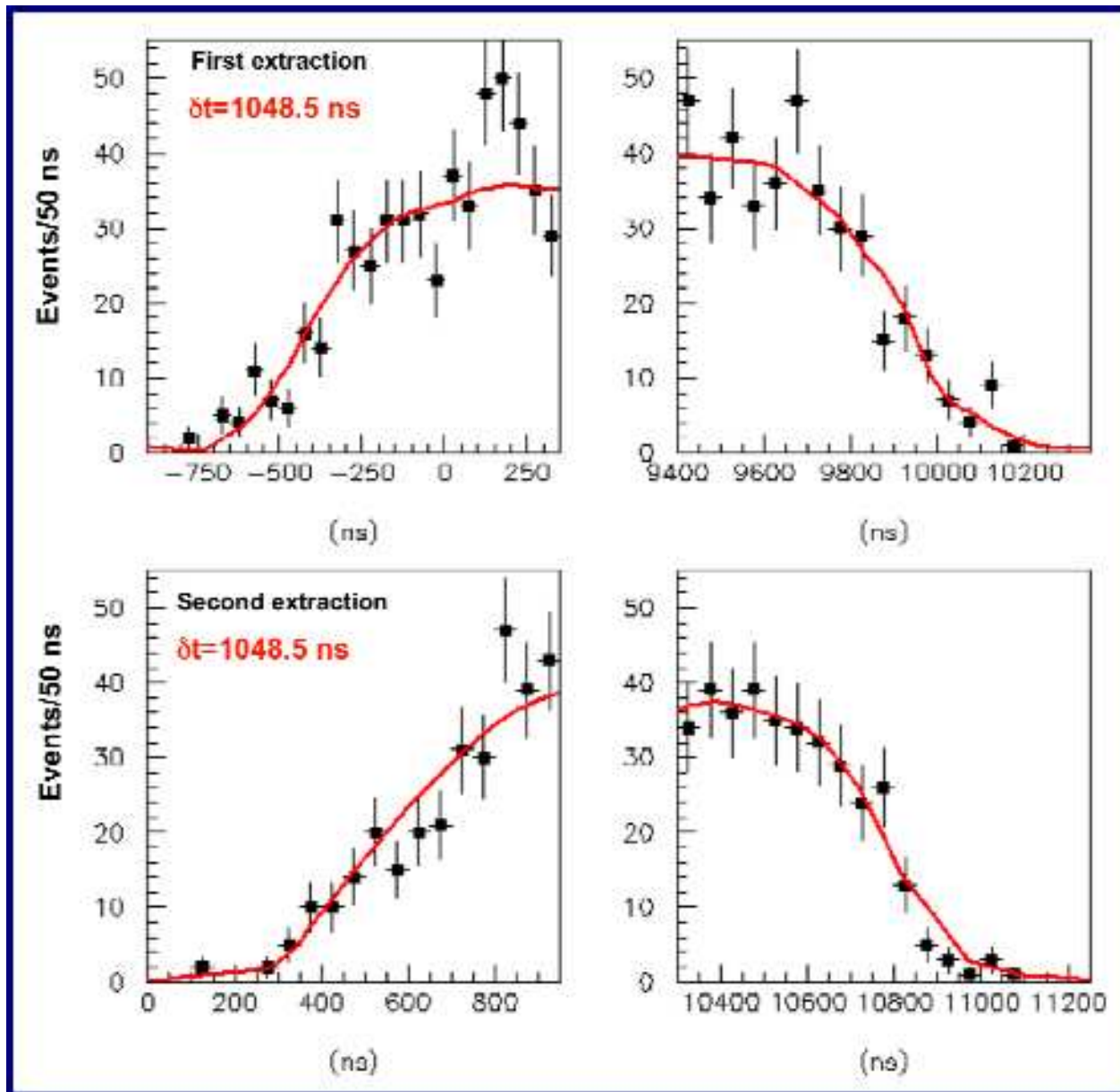
χ^2 / df :

1.06 (1. protoncsomag)

1.12 (2. protoncsomag)



OPERA: időspektrum illesztése



OPERA: időmérés eredménye

Instrumentális késleltetések mérése
hordozható Cs atomórákkal

Események: 7586 belső müon, 8525 sziklában áttöltődött

Illesztett késleltetés:

Összes eseményre: $(1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)}) \text{ ns}$
Csak belső müonokra: $(1047.4 \pm 11.2 \text{ (stat.)}) \text{ ns}$

Kalibrációs „doboz” felnyitása után:

$$\begin{aligned} \delta t &= \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = \\ &(1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)}) \text{ ns} - 987.8 \text{ ns} = \\ &\boxed{(60.7 \pm 6.9 \text{ (stat.)} \pm 7.4 \text{ (sys.)}) \text{ ns}} \end{aligned}$$

OPERA állítása: Illesztés proton-eloszláshoz pontosabb,
mint pl. közeli neutrínó-detektor eseményeihez.

Rengeteg ellenvetés, spekuláció

Cohen és Glashow: vákuumbeli Cserenkov-sugárzás

$v_\nu > c$ esetén \Rightarrow jelentős energiavesztés

InSpire: 131 cikk 1 hónap alatt a témában

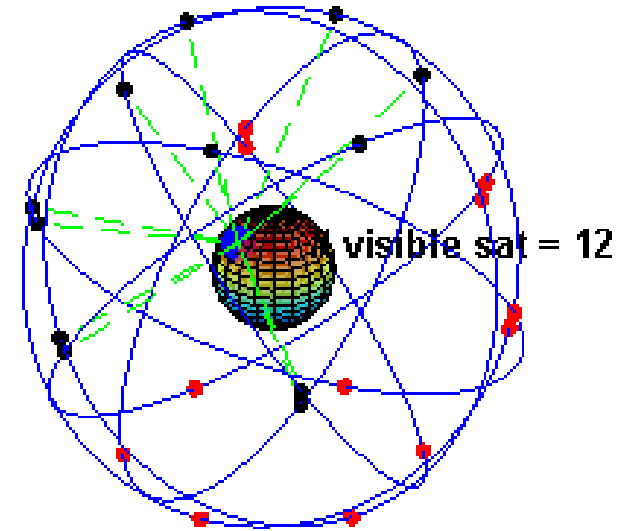
Rengeteg különbség OPERA és SN-1987A között:

10 MeV \Leftrightarrow 17 GeV; $\bar{\nu}_e \Leftrightarrow \nu_\mu$; vákuum \Leftrightarrow szikla

Ellenvetés: GPS-hiba

R.A.J. van Elburg, arXiv:11102685v3

GPS-műhold 20 e km magasan 3900 m/s sebességgel mozog a CERN – LNGS vonalon, akkor relativisztikus időrövidülés miatt a felszíni megfigyelőhöz képest 32 ns-mal kevesebbet mér. Két irányban az éppen 60 ns.



De:

- 31 műhold mozog mindenféle irányban, ez legfeljebb kiszélesítené a spektrumot.
- A műholdakat 1-2 ns pontossággal egymáshoz hangolják, ez nem volna lehetséges a relativisztikus hatás elhanyagolása mellett.
- 32 ns hiba 10 m-t jelentene, annál a hadászati GPS, amelynek vevőjében atomóra van, akár OPERÁ-nál, sokkal pontosabb.
- A GPS-műholdak időjelzésének pontossága elvben 14 ns.
- A GPS-műhold időjelét még ált. relativitáselméletre is korrigálják, és

Kísérleti ellenőrzés

CNGS: 1-2 ns hosszú ν -impulzusok 500 ns távolságra

Régebbi MINOS-adatokat megnézik, de nincs remény igazi ellenőrzésre

MINOS és T2K nekilát pontosabb mérésnek, de 2012 előtt semmi

Köszönöm a figyelmet!